

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 09-033223

(43)Date of publication of application : 07.02.1997

(51)Int.Cl.

G01B 11/06  
 C23C 14/24  
 C30B 25/16  
 H01L 21/20  
 H01L 21/205  
 H01L 21/66  
 H01S 3/18

(21)Application number : 07-202872

(71)Applicant : SEIKO EPSON CORP

(22)Date of filing : 17.07.1995

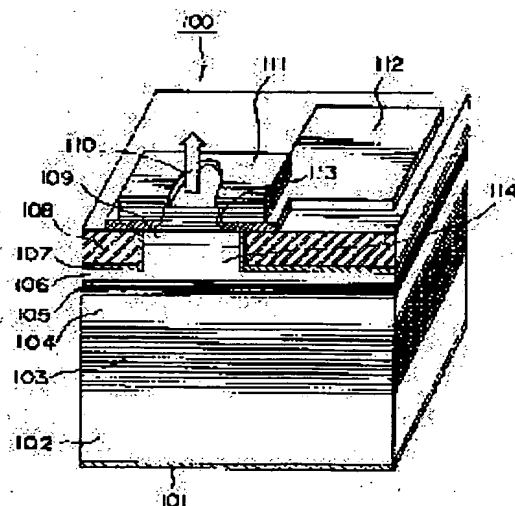
(72)Inventor : KONDO TAKAYUKI  
 MORI KATSUMI  
 KANEKO TAKEO

(54) OPTICAL FILM-THICKNESS MEASURING METHOD, FILM FORMATION METHOD AND MANUFACTURE OF SEMICONDUCTOR LASER DEVICE

(57)Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To optically measure a film thickness simultaneously with a film formation process by measuring a first film with a first monitoring light and a second film with a second monitoring light in a plurality of films to be laminated containing a first film with a reflectance at a specific % or higher in a prescribed wavelength band and a second film with an absorption coefficient at a specific value or lower.

**SOLUTION:** A first film 104 with a reflectance of 98% or higher and a second film 106 with an absorption coefficient of 1000cm<sup>-1</sup> or lower in a prescribed wavelength band are formed on a substrate 102. Then, the first film 1-4 is measured by first monitoring light, and the second film 106 is measured by second monitoring light. Then, a forward voltage is applied across an upper-side electrode 112 and a lower-side electrode 101, and a current is injected. The current is transduced into light by a quantum well active layer 105, the light is amplified when the light is moved back and forth between reflecting mirrors which are constituted of a DBR mirror 103 and a dielectric multilayer film mirror 111; and a laser beam is radiated in a direction perpendicular to the substrate 102 from an opening part 113.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

14.12.2001

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the  
 examiner's decision of rejection or application  
 converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

3624476

[Date of registration]

10.12.2004

[Number of appeal against examiner's decision of

rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision  
of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19) 日本国特許庁 (J P)

## (12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平9-33223

(43) 公開日 平成9年(1997)2月7日

(51) Int.Cl. <sup>6</sup>	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
G 0 1 B 11/06			G 0 1 B 11/06	Z
C 2 3 C 14/24			C 2 3 C 14/24	U
C 3 0 B 25/16			C 3 0 B 25/16	
H 0 1 L 21/20			H 0 1 L 21/20	
21/205			21/205	

審査請求 未請求 請求項の数12 F D (全 17 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願平7-202872	(71) 出願人	000002369 セイコーエプソン株式会社 東京都新宿区西新宿2丁目4番1号
(22) 出願日	平成7年(1995)7月17日	(72) 発明者	近藤 貴幸 長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内
		(72) 発明者	森 克己 長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内
		(72) 発明者	金子 丈夫 長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内
		(74) 代理人	弁理士 井上 一 (外2名)

(54) 【発明の名称】 光学的膜厚測定方法、膜形成方法および半導体レーザ装置の製造方法

## (57) 【要約】

【課題】 成膜工程と同時に光学的膜厚を正確に測定することができ、例えば反射ミラーを含む半導体レーザ装置の半導体層の成膜工程に適用することができる光学的膜厚測定方法、膜形成方法、およびこれらの方法を適用した半導体レーザ装置の製造方法を提供する。

【解決手段】 光学的膜厚測定方法および膜形成方法は、基板上に複数の膜を積層する際に、基板に向けてモニタ光を照射し、その反射強度の極値から膜の厚さを測定する光学的膜厚測定方法において、積層される複数の膜は、所定の波長帯域において98%以上の反射率を有する第1の膜と、この第1の膜上に形成され、かつ前記所定の波長帯域において1000 cm<sup>-1</sup>以下の吸収係数を有する第2の膜とを含む。そして、前記第1の膜は、所定波長を有する第1のモニタ光によって測定され、前記第2の膜は前記所定の波長帯域と異なる波長を有する第2のモニタ光によって測定される。

1

## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板上に複数の膜を積層する際に、基板に向けてモニタ光を照射し、その反射強度の極値から光学的膜厚を測定する光学的膜厚測定方法において、積層される複数の膜は、所定の波長帯域において98%以上の反射率を有する第1の膜と、この第1の膜上に形成され、かつ前記所定の波長帯域において $1000\text{ cm}^{-1}$ 以下の吸収係数を有する第2の膜とを含み、前記第1の膜は、所定波長を有する第1のモニタ光によって測定され、

前記第2の膜は、前記所定の波長帯域と異なる波長を有する第2のモニタ光によって測定されることを特徴とする光学的膜厚測定方法。

【請求項2】 請求項1において、前記第2のモニタ光は、前記所定の波長帯域より短い波長を有することを特徴とする光学的膜厚測定方法。

【請求項3】 請求項1または請求項2において、前記第1のモニタ光は、前記所定の波長帯域に含まれることを特徴とする光学的膜厚測定方法。

【請求項4】 基板上に複数の膜を積層する膜形成方法において、積層される複数の膜は、所定の波長帯域において98%以上の反射率を有する第1の膜と、この第1の膜上に形成され、かつ前記所定の波長帯域において $1000\text{ cm}^{-1}$ 以下の吸収係数を有する第2の膜とを含み、前記第1の膜は、所定波長を有する第1のモニタ光を基板に向けて照射し、その反射強度の極値から光学的膜厚をモニタしながら形成され、前記第2の膜は、前記所定の波長帯域と異なる波長を有する第2のモニタ光を基板に向けて照射し、その反射強度の極値から光学的膜厚をモニタしながら形成されることを特徴とする膜形成方法。

【請求項5】 請求項4において、前記第2のモニタ光は、前記所定の波長帯域より短い波長を有することを特徴とする膜形成方法。

【請求項6】 請求項4または請求項5において、前記第1のモニタ光は、前記所定の波長帯域に含まれることを特徴とする膜形成方法。

【請求項7】 第1導電型の化合物半導体からなる基板上に、少なくとも、第1導電型の分布反射型多層膜ミラー、第1導電型の第1クラッド層、活性層、第2導電型の第2クラッド層および第2導電型のコンタクト層を含む半導体層をエピタキシャル成長によって形成する工程を含み、前記分布反射型多層膜ミラーは、成膜時に、所定波長の第1のモニタ光を基板に向けて照射してその反射強度を測定し、この反射強度の極値で屈折率の異なる一方の半導体層の堆積から他方の半導体層の堆積に切り替えることによって、低屈折率の半導体層と高屈折率の半導体層とを交互に積層して形成され、かつ所定の波長帯域にお

2

いて98%以上の反射率を有し、

前記第1クラッド層は、前記分布反射型多層膜ミラーにおける前記所定の波長帯域と異なる波長を有する第2のモニタ光を基板に向けて照射し、その反射強度の極値をモニタすることによって光学的膜厚を制御しながら形成されることを特徴とする半導体レーザ装置の製造方法。

【請求項8】 請求項7において、前記分布反射型多層膜ミラーは、前記所定の波長帯域で99%以上の反射率を有することを特徴とする半導体レーザ装置の製造方法。

【請求項9】 請求項7または請求項8において、前記第1クラッド層は、 $1000\text{ cm}^{-1}$ 以下の吸収係数を有することを特徴とする半導体レーザ装置の製造方法。

【請求項10】 請求項7～請求項9のいずれかにおいて、前記第2のモニタ光は、前記所定の波長帯域より小さい波長を有することを特徴とする半導体レーザ装置の製造方法。

【請求項11】 請求項7～請求項10のいずれかにおいて、前記第1のモニタ光は、設計発振波長と同等の波長を有することを特徴とする半導体レーザ装置の製造方法。

【請求項12】 請求項7～請求項11のいずれかにおいて、前記活性層、前記第2クラッド層および前記コンタクト層は前記第1のモニタ光によって光学的膜厚を制御しながら形成されることを特徴とする半導体レーザ装置の製造方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、基板上に複数の膜を積層する際に用いられる光学的膜厚測定方法、この光学的膜厚測定方法を適用した膜形成方法および半導体レーザ装置の製造方法に関する。

## 【0002】

【従来の技術】 例えば、半導体レーザ装置は、基板上に複数の半導体層をエピタキシャル結晶成長によって積層して形成される。

【0003】 従来のこの種の結晶成長方法では、通常、サンプル基板に所定の半導体層を形成した後、これを反応管外に取り出して、例えば半導体層の断面膜厚の測定や、反射スペクトルの測定等を用いて前記半導体層の光学的膜厚から結晶成長速度をあらかじめ求め、この結晶成長速度と成膜時間で層の光学的膜厚を制御している。しかし、この方法では幾つかの問題を有する。

【0004】 第1の問題は、この方法では結晶の成長速度を常に一定にしなければならず、成長速度がロット間で再現しなかったり、成長速度が揺らぐと光学的膜厚を正確に制御することができないことである。例えば、

10

30

40

50

分布反射型多層膜ミラー（DBRミラー）は各半導体層の光学的膜厚を正確に制御することにより高い反射率を得る必要があるが、従来の結晶成長速度と成長時間で制御する方法では成長速度の揺らぎによって光学的膜厚を正確に制御することが困難であり、その結果、反射帯域波長を設計どおりに作成することが難しい。

【0005】また、第2の問題は、光学的膜厚を決定する要因として、屈折率 $n$ の値があるが、半導体層は波長によって屈折率も変化するため、所定の波長での各層の屈折率も厳密に測定しなければならず、そしてこの測定は非常に困難であることである。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】本発明は、上述の従来技術の問題を解決し、その目的は、成膜工程と同時に光学的膜厚を正確に測定することができ、特に高い反射率を有する半導体層を含む積層体、例えば反射ミラーを含む半導体レーザ装置の半導体層に好適な光学的膜厚測定方法、膜形成方法、およびこれらの方法を適用した半導体レーザ装置の製造方法を提供することにある。

【0007】

【課題を解決するための手段】本発明の光学的膜厚測定方法は、基板上に複数の膜を積層する際に、基板に向けてモニタ光を照射し、その反射強度の極値から光学的膜厚を測定する光学的膜厚測定方法において、積層される複数の膜は、所定の波長帯域において98%以上の反射率を有する第1の膜と、この第1の膜上に形成され、かつ前記所定の波長帯域において $1000\text{ cm}^{-1}$ 以下の吸収係数を有する第2の膜とを含み、前記第1の膜は、所定波長を有する第1のモニタ光によって測定され、前記第2の膜は前記所定の波長帯域と異なる波長を有する第2のモニタ光によって測定されることを特徴とする。

【0008】さらに、この光学的膜厚測定方法を適用した、本発明の膜形成方法は、基板上に複数の膜を積層する膜形成方法において、積層される複数の膜は、所定の波長帯域において98%以上の反射率を有する第1の膜と、この第1の膜上に形成され、かつ前記所定の波長帯域において $1000\text{ cm}^{-1}$ 以下の吸収係数を有する第2の膜とを含み、前記第1の膜は、所定波長を有する第1のモニタ光を基板に向けて照射し、その反射強度の極値から光学的膜厚をモニタしながら形成され、前記第2の膜は、前記所定の波長帯域と異なる波長を有する第2のモニタ光を基板に向けて照射し、その反射強度の極値から光学的膜厚をモニタしながら形成されることを特徴とする。

【0009】これらの光学的膜厚測定方法および膜形成方法においては、98%以上、好ましくは99%以上、さらに好ましくは99.5%以上の高反射率を有する所定の波長帯域（以下、これを「高反射帯域」という）を有する第1の膜上に、 $1000\text{ cm}^{-1}$ 以下、好ましくは $100\text{ cm}^{-1}$ 以下の吸収係数を有する第2の膜を形成す

る際に、第2の膜のモニタ光の波長は前記高反射帯域と異なる波長から選択される。このように第2のモニタ光の波長を第1の膜の高反射帯域の波長と異なる波長にすることにより、第1の膜の反射の影響を受けずに、吸収係数の小さい、つまり前記数値範囲の吸収係数を有し透明もしくは透明に近い第2の膜の光学的膜厚を正確に測定し、かつその光学的膜厚を正確に制御することができる。

【0010】そして、前記第2のモニタ光は、前記高反射帯域より短い波長を有することが好ましい。これは、モニタ光によって測定できる光学的な最小膜厚は反射強度の極値、つまり隣接する極大点と極小点との間隔から得られ、この最小光学的膜厚はモニタ光の波長の $1/4$ に相当するため、モニタ光の波長が短いほど、測定可能な光学的膜厚を小さくすることができ、より正確な測定が可能であるからである。

【0011】また、前記第1の膜をモニタするための第1のモニタ光は、前記高反射帯域に含まれる波長であることが好ましい。例えば、第1の膜が多層反射膜のように、屈折率の異なる2種類の層をそれぞれ所定波長に相当する光学的膜厚で交互に積層していく場合には、モニタ光として前記所定波長の光を用いることにより、光学的膜厚制御がより正確にかつ直接的に行えるからである。

【0012】本発明の半導体レーザ装置の製造方法は、前記光学的膜厚測定方法および膜形成方法が適用され、具体的には、第1導電型の化合物半導体からなる基板上に、少なくとも、第1導電型の分布反射型多層膜ミラー、第1導電型の第1クラッド層、活性層、第2導電型の第2クラッド層および第2導電型のコンタクト層を含む半導体層をエピタキシャル成長によって形成する工程を含み、前記分布反射型多層膜ミラーは、成膜時に、所定波長の第1のモニタ光を基板に向けて照射してその反射強度を測定し、この反射強度の極値で屈折率の異なる一方の半導体層の堆積から他方の半導体層の堆積に切り替えることによって、低屈折率の半導体層と高屈折率の半導体層とを交互に積層して形成され、かつ所定の波長帯域において98%以上の反射率を有し、前記第1クラッド層は、前記分布反射型多層膜ミラーにおける前記所定の波長帯域と異なる波長を有する第2のモニタ光を基板に向けて照射し、その反射強度の極値をモニタすることによって光学的膜厚を制御しながら形成されることを特徴とする。

【0013】前記分布反射型多層膜ミラーは、前記光学的膜厚測定方法および膜形成方法における第1の膜に相当する。そして、前記分布反射型多層膜ミラーは、成膜時に所定波長を有する第1のモニタ光を基板上に照射してその反射強度を検出することにより、基板上に形成された半導体層の反射強度変化（反射率スペクトル）を測定し、この反射率スペクトルの極値（極大点および極小

10

20

30

40

50

点)で屈折率の異なる一方の半導体層の堆積から他方の半導体層の堆積に切り替えることによって、低屈折率の半導体層と高屈折率の半導体層とを交互に積層して形成される。

【0014】この製造方法においては、第1のモニタ光は、室温での分布反射型多層膜ミラーの設計波長(高反射帯域の中心波長) $\lambda_0$ と同じ波長、より厳密には設計波長 $\lambda_0$ に成膜時における温度補正を加えた波長(以下、これを「補正波長」という) $\lambda_0'$ を用いることが好ましい。光学的膜厚は、屈折率の逆数と膜厚の積で表されるが、結晶膜の屈折率には材質固有の温度依存性があり、光学的膜厚は熱膨張係数にしたがう温度依存性を持つため、成膜中の光学的膜厚をモニタする場合には、成膜温度と材質を考慮した波長の補正を行う必要がある。そして、分布反射型多層膜ミラーの設計波長に相当する波長 $\lambda_0$ 、好ましくは補正波長 $\lambda_0'$ を有する第1のモニタ光でモニタすることで、反射強度の極大点および極小点の間隔を設計波長の $1/4$ 波数に一致させることができ、分布反射型多層膜ミラーの各層の光学的膜厚の制御がより正確にかつ直接的に行える。

【0015】前記反射率スペクトルは、結晶の成長速度や成長時間に依存せず、各層の光学的膜厚のみに依存している。従って、反射率スペクトルの極値で積層する層の組成を変更し、屈折率の違う層を交互にエピタキシャル成長させることにより、各層が理論通りの厚さを有する。また、反射強度を測定するためのモニタ光の光源として、例えば所定の発振波長を持つ半導体レーザを選ぶことにより、所定波長を厳密に設定できる。そして、分布反射型多層膜ミラー自体の反射強度を結晶成長中に測定できることから、層形成中にミラーのペア数を変更したり、構造の最適化がはかれる。

【0016】前記分布反射型多層膜ミラーは、高反射帯域で、98%以上、好ましくは99%以上、より好ましくは99.5%以上の反射率を有する。

【0017】前記第1クラッド層は、前記分布反射型多層膜ミラーにおける高反射帯域と異なる波長、好ましくは該高反射帯域より小さい波長を有する第2のモニタ光によって、光学的膜厚を測定しながら形成される。前記第1クラッド層は、 $1000\text{ cm}^{-1}$ 以下、好ましくは $100\text{ cm}^{-1}$ 以下、より好ましくは $10\sim100\text{ cm}^{-1}$ の吸収係数を有する。第1クラッド層は、活性層への注入キャリア(電子および正孔)の閉じ込めのためのポテンシャル障壁として機能し、同時にレーザ共振器の光導波路の一部を構成する。従って、第1クラッド層の光吸収つまり光損失の存在は、しきい値電流の上昇、レーザ出力効率の低下、あるいは素子内の発熱など特性の悪化の原因となり、そのため第1クラッド層の吸収係数はできるだけ小さいことが望ましい。

【0018】本発明の半導体レーザ装置の製造方法において、第1クラッド層のモニタ光の波長を分布反射型多

層膜ミラーの高反射帯域と異なる波長に設定する理由は、以下の通りである。すなわち、前記分布反射型多層膜ミラーは、設計発振波長において、通常は設計発振波長 $\pm 30\text{ }\mu\text{m}$ の範囲において100%に近い反射率を有し、かつ前記第1クラッド層は設計発振波長およびその近傍の波長に対して光吸収が小さい材質を用いるため、第1クラッド層の形成時に第1のモニタ光と同じモニタ光を用いたのでは、分布反射型多層膜ミラーの反射強度が反映して第1クラッド層の光学的膜厚に対応する反射強度の変化が非常に小さくなり、反射率の極大点および極小点の判別が困難となる。そこで、本発明においては、第1クラッド層のモニタ光として分布反射型多層膜ミラーの高反射帯域と異なる波長の第2のモニタ光を用いることにより、反射強度の極値の判別が明瞭となり、その結果第1クラッド層の光学的膜厚を正確にモニタすることができる。

【0019】また、前記第2のモニタ光は前記高反射帯域より短い波長を有する光を用いることにより、前述したように、制御可能な最小光学的膜厚を小さくすることができ、より精度の高い測定を行うことができる。

【0020】さらに、本発明の半導体レーザ装置の製造方法においては、前記第1クラッド層のモニタに引き続いて、前記活性層、第2クラッド層およびコンタクト層の形成において、前記第1のモニタ光によって光学的膜厚をモニタしながら成膜されることが好ましい。

【0021】本発明の製造方法によって形成された半導体レーザ装置は、各層、特に分布反射型多層膜ミラーおよび第1クラッド層の光学的膜厚が厳密に制御され、発振しきい値、外部微分量子効率などの特性が優れた半導体レーザ装置を提供することができる。

【0022】本発明の半導体レーザ装置の製造方法は、分布反射型多層膜ミラーおよび第1クラッド層を含む半導体レーザ装置であれば適用することができ、例えば埋め込み方法、電流狭窄方法、活性層の構造、上部反射膜の構造などは特に限定されず、種々の態様を取りうる。

【0023】さらに、本発明の光学的膜厚測定方法および膜形成方法は、半導体レーザ装置の製造方法のみならず、例えば、フォトダイオード、フォトトランジスタ、ライトバルブなどの装置の製造方法にも適用することができる。

#### 【0024】

【発明の実施の形態】図1は、本発明の光学的膜厚測定方法および膜形成方法を適用して形成された面発光型半導体レーザ装置の一例の断面を模式的に示す斜視図である。

【0025】(半導体レーザの構造)図1に示す半導体レーザ装置100は、n型GaAs基板102上に、n型 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ 層とn型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 層とを交互に積層し波長800nm付近の光に対し99.5%以上の反射率を持つ分布反射型多層膜ミラー(以

下、これを「DBRミラー」と表記する) 103、n型  $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  層からなる第1クラッド層104、  
n<sup>-</sup>型  $\text{GaAs}$  ウェル層とn<sup>-</sup>型  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  バ  
リア層から成る量子井戸活性層105、p型  $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  層からなる第2クラッド層106およびp<sup>+</sup>型  
 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$  層からなるコンタクト層109  
が、順次積層されて成る。

【0026】そして、第2クラッド層106の途中ま  
で、半導体の積層体の上面からみて例えば円形形状の柱  
状部114 (以下、この部分を「共振器部」と記す) が 10  
形成されるようにエッチングされている。柱状部114  
の周囲は、例えば熱CVD法により形成された  $\text{SiO}_2$   
等のシリコン酸化膜 ( $\text{SiO}_x$  膜) からなる第1絶縁層  
107と、例えばポリイミド等の耐熱性樹脂からなる第  
2絶縁層108とで埋め込まれている。第1絶縁層10  
7は、第2クラッド層106およびコンタクト層109  
の表面に沿って連続して形成され、第2絶縁層108  
は、この第1絶縁層107の周囲を埋め込む状態で形成  
されている。

【0027】また、例えばCrとAu-Zn合金で構成 20  
されるコンタクト金属層 (上側電極) 112は、コンタ  
クト層109とリング状に接触して形成され、電流注入  
のための電極となる。このコンタクト層109の上側電  
極112で覆われていない部分は、円形に露出してい  
る。そして、そのコンタクト層109の露出面 (以後、  
この部分を「開口部113」と記す) を充分に覆う面積  
で、 $\text{SiO}_2$ 等の  $\text{SiO}_x$  層と  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  層とを交互に積層  
し波長800nm付近の光に対し98.5~99.5%  
の反射率を持つ誘電体多層膜ミラー111が形成されて  
いる。

【0028】また、n型  $\text{GaAs}$  基板102の下には、  
例えばNiとAu-Ge合金から成る電極用金属層 (下  
側電極) 101が形成されている。

【0029】そして、上側電極112と下側電極101  
との間に順方向の電圧が印加されて (本実施例の場合  
は、上側電極112から下側電極101へ方向に電圧  
が印加される)、電流注入が行なわれる。注入された電  
流は、量子井戸活性層105で光に変換され、DBRミ  
ラー103と誘電体多層膜ミラー111とで構成される 40  
反射鏡の間をその光が往復することにより増幅され、開  
口部113 (コンタクト層109の露出面) から矢印1  
10で示す方向すなわち基板102に対して垂直方向に  
レーザ光が放射される。

【0030】本実施例の半導体レーザ装置は、以下に示  
す構造上の特徴を有することが望ましい。

#### 【0031】(A) DBRミラーの構造

DBRミラー103は、設計発振波長に対してDBRミ  
ラーの反射率が充分に高い必要がある。DBRミラーの  
反射率のピークはDBRミラーを構成する半導体層 ( $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  /  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ) の光学的膜 50

厚を正確に制御する事によって得られ、ピーク反射率の  
値はDBRミラーの対数を多くする事によって上げること  
ができる。ところで、通常ウェハ面内で結晶層の光学的  
膜厚は完全に均一ではないので、DBRミラーの反射  
率スペクトルはウェハ面内である範囲の分布を持ってい  
る。従って、DBRミラーの反射率は、設計発振波長に  
対して±30nmの領域において、98%以上、好まし  
くは99%以上、さらに好ましくは99.5%以上の反  
射率を有する。この反射率の条件を満たさないと、ウェ  
ハ面内でレーザ発振を起こさない領域が生じてしまう事  
がある。本実施例においては、DBRミラーとして25  
~50ペア、好ましくは40ペアの半導体層を積層して  
あり、ウェハ面内で例えば±2.5%の光学的膜厚の分  
布があっても、設計発振波長でレーザ発振を起こさせる  
ことが可能である。

#### 【0032】(B) クラッド層の構造

第1クラッド層104および第2クラッド層106は、  
その光学的膜厚が厳密に制御される必要がある。つま  
り、レーザ発振時においては、共振器内に生ずる定在波  
の電解強度分布の極大部と活性層位置 (厚さ方向) とを  
一致させる必要がある。両者を一致させることで、レー  
ザ発振の源である活性層でのキャリアの誘導放出、再結  
合が効率よく実現される。この活性層でのキャリアの誘  
導放出、再結合の効率は、活性層内に存在する定在波の  
電解強度の積分に比例する。この定在波の電解強度は、  
積層方向 (厚さ方向) に対して  $\sin$  の2乗の曲線で示  
される変化の大きな分布を有している。そのため、活性  
層が薄い場合、例えば活性層の光学的膜厚が発振波長の  
1波長より小さい場合などには、活性層の位置がわずか  
にずれただけでも、発振しきい値および効率などに大き  
く影響する。そのため、活性層の位置を精密に制御する  
ためには、クラッド層、特に第1クラッド層の光学的膜  
厚の制御は極めて重要である。

#### 【0033】(C) 量子井戸活性層の構造

量子井戸活性層105は、n<sup>-</sup>型  $\text{GaAs}$  ウェル層とn<sup>-</sup>  
型  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  バリア層から成る。本実施例の場合  
は、多重量子井戸構造 (MQW) の活性層となってい  
る。ウェル層の光学的膜厚は、40~120オングスト  
ローム、好ましくは45オングストローム、バリア層の  
光学的膜厚は40~100オングストローム、好ましく  
は40オングストローム、ウェル層の総数は10~40  
層、好ましくは21層である。これにより、面発光型半  
導体レーザ装置の低閾値化、高出力化、温度特性の向  
上、発振波長の再現性の向上が達成できる。

#### 【0034】(D) 埋込み絶縁層の構造

埋込み絶縁層は、前述したように、例えば熱CVD法に  
より形成された膜厚の薄い緻密なシリコン酸化膜 (第1  
絶縁層) 107と、その上に埋め込まれ、素子の表面を  
平坦化するための第2絶縁層108との2層構造から構  
成されている。この構造において、薄い第1絶縁層10

7を形成する理由は、その後に形成する第2絶縁層108は不純物(例えばナトリウム、塩素、重金属、水等)を多く含有しやすいので、その不純物が第2クラッド層106中や量子井戸活性層105中へ熱等により拡散することを阻止するためである。したがって、第1絶縁層107は、不純物を阻止できる膜質および膜厚(例えば50~200nm)を有すればよい。本実施例においては、第1絶縁層107は、例えば500~600℃の高温の熱CVDにより形成されるため、素子への熱の悪影響を考慮して、この第1絶縁層107を厚くして1層とするのではなく、薄い第1絶縁層107と、膜質が緻密でなくても、より低温で形成できる第2絶縁層108との2層構造とした。

【0035】第2絶縁層108は、前述のポリイミド等の耐熱性樹脂の他に、プラズマCVD、TEOS等の有機原料CVDなどの方法で比較的低温(400℃以下)で形成できるSiO<sub>2</sub>等のシリコン酸化物(SiO<sub>x</sub>膜)、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>等のシリコン窒化膜(SiN<sub>x</sub>)、SiC等のシリコン炭化物(SiC<sub>x</sub>)、SOG(スピノングラス法によるSiO<sub>2</sub>等のSiO<sub>x</sub>)などの絶縁性シリコン化合物、あるいは多結晶のIII-V族化合物半導体(例えばZnSe)などから構成されてもよい。これら、絶縁物の中でも、低温で形成可能であるSiO<sub>2</sub>等のシリコン酸化物、ポリイミドまたはSOGを用いるのが好ましく、さらには、形成が簡単であり、容易に表面が平坦となることからSOGを用いるのが好ましい。

【0036】第1絶縁層を構成するシリコン酸化膜(SiO<sub>x</sub>膜)の形成方法には、プラズマCVD法、反応性蒸着法など幾つかの種類があるが、SiH<sub>4</sub>(モノシラン)ガスとO<sub>2</sub>(酸素)ガスを用い、N<sub>2</sub>(窒素)ガスをキャリアガスとする常圧熱CVD法による成膜方法が最も適している。その理由は、反応を大気圧で行い、更にO<sub>2</sub>が過剰な条件下で成膜するのでSiO<sub>x</sub>膜中の酸素欠損が少なく緻密な膜となること、および、ステップ・カバーレージが良く、共振器部114の側面および段差部も平坦部とほぼ同じ光学的膜厚が得られることである。

【0037】また、本実施例においては、埋込み絶縁層が量子井戸活性層105に至らない状態、つまり、共振器部114以外の領域において、第1絶縁層107と量子井戸活性層105との間に、第2クラッド層106を所定の厚さ(t)だけ残すように形成されている。この残す膜厚tは、好ましくは0~0.58μm、さらに好ましくは0~0.35μmに設定される。これにより、面発光型半導体レーザ装置において、埋込み絶縁層部分の界面再結合電流をなくし、高効率化、高信頼性化が達成できる。

【0038】さらに、このクラッド層の残り膜厚tの好ましい数値範囲について、図2を用いて説明する。図2において、縦軸は外部微分量子効率を示す傾き(スロープ効率)の値を示し、横軸はクラッド層の残り膜厚tを

示す。スロープ効率が0.1(つまり10%)であるということは、10mAの電流でも1mWの光出力しか得られないことになる。一般的に、この10mAという電流値は、レーザ素子が熱飽和する電流値に近い電流値であり、ほとんど限界に近いものである。従って、実用上要求される傾きは0.1以上であり、図2からスロープ効率が0.1の時の残り膜厚tは、約0.58μmとなり、このことから好ましい残り膜厚tは0~0.58μmとなる。

【0039】(E)誘電体多層膜ミラーの構造

誘電体多層膜ミラー111は、SiO<sub>2</sub>等のSiO<sub>x</sub>層とTa<sub>2</sub>O<sub>5</sub>層とを交互に積層し設計共振波長の光に対し98.5~99.5%の反射率を持つ、6~9ペア、好ましくは7ペアの誘電体多層膜から形成されている。反射率が98.5%より低いと、共振電流が大幅に増大してしまう。逆に、反射率が99.5%よりも大きいと光出力が外部に取り出しにくく、外部微分量子効率が低下してしまう。従って、前述の反射率になるように誘電体多層膜ミラー111の対数を決定して薄膜を形成する。更に、誘電体の材料として、レーザ共振波長に対して光の吸収損失が少ない特性のものを使用することが、閾値を低くし外部微分量子効率を向上させるために重要である。この誘電体多層膜ミラー111を構成するTa<sub>2</sub>O<sub>5</sub>層の代わりに、ZrO<sub>x</sub>膜、ZrTiO<sub>x</sub>膜、TiO<sub>x</sub>膜も用いられる。これにより、面発光型半導体レーザ装置の低閾値化、外部微分量子効率の向上が達成できる。

【0040】(半導体レーザ装置の製造方法)次に、図1に示す面発光型半導体レーザ装置100の製造プロセスの一例について説明する。図3(A)~(C)および図4(D)~(F)は、面発光型半導体レーザ装置の製造工程を模式的に示したものである。

【0041】(A)n型GaAs基板102に、n型Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As層とn型Al<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As層とを交互に積層して波長800nm付近の光に対し99.5%以上の反射率を持つ、例えば40ペアのDBRミラー103を下部ミラーとして形成する。さらに、n型Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As層(第1クラッド層)104を形成した後、n型GaAsウエル層とn型Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>Asバリア層とを交互に積層した量子井戸構造(MQW)の活性層105を形成する。その後、p型Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>As層(第2クラッド層)106、およびp型Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>As層(コンタクト層)109を順次積層する(図3(A)参照)。

【0042】上記の各層は、有機金属気相成長(MOVPE: Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy)法でエピタキシャル成長させた。この時、例えば、成長温度は750℃、成長圧力は150 Torrで、III族原料にTMGa(トリメチルガリウム)、TMAI(トリメチルアルミニウム)の有機金属を用い、V族原料にAsH<sub>3</sub>、n型ドーパント



に $\text{H}_2\text{Se}$ 、p型ドーパントに $\text{DEZn}$ （ジエチルジンク）を用いた。

【0043】このエピタキシャル成長工程においては、後に詳述するように、本願発明の特徴を成す光学的膜厚測定方法および膜形成方法を用い、各層の光学的膜厚を正確に制御しながら成膜を行っている。

【0044】各層の形成後、エピタキシャル層上に常圧熱CVD法を用いて、25nm程度の $\text{SiO}_2$ 層からなる保護層Iを形成する。この保護層Iが、積層された半導体層を覆うことにより、プロセス中の表面汚染を防いでいる。

【0045】(B)次に、反応性イオンビームエッチング(RIBE)法により、レジストパターンR1で覆われた柱状の共振器部114を残して、第2クラッド層106の途中までエッチングする。このエッチングプロセスの実施により、共振器部114を構成する柱状部は、その上のレジストパターンR1の輪郭形状と同じ断面を持つ(図3(B)参照)。また、RIBE法を用いるため、前記柱状部の側面はほぼ垂直であり、またエピタキシャル層へのダメージもほとんどない。RIBEの条件としては、例えば、圧力60mPa、入力マイクロ波のパワー150W、引出し電圧350Vとし、エッチングガスには塩素およびアルゴンの混合ガスを使用した。

【0046】このRIBE法による柱状部の形成においては、エッチング中、前記基板102の温度は好ましくは0~40℃、より好ましくは10~20℃に設定される。このように基板の温度を比較的低温に保持することにより、エピタキシャル成長によって積層される半導体層のサイドエッチングを抑制することができる。ただし、基板の温度が0~10℃であると、サイドエッチングを抑制するという点からは好ましいが、エッチングレートが遅くなってしまうために実用的には不向きである。また、基板の温度が40℃を越えると、エッチングレートが大きくなりすぎるため、エッチング面が荒れてしまうだけでなく、エッチングレートの制御がしにくいという不都合がある。

【0047】(C)この後、レジストパターンR1を取り除き、常圧熱CVD法で、表面に100nm程度の $\text{SiO}_2$ 層(第1絶縁膜)107を形成する。この際のプロセス条件としては、例えば、基板温度450℃、原料として $\text{SiH}_4$ (モノシラン)と酸素を使用し、キャリアガスには窒素を用いた。さらにこの上にスピコート法を用いてSOG(Spin on Glass)膜108Lを塗布し、その後、例えば、80℃で1分間、150℃で2分間、さらに300℃で30分間、窒素中でベーキングする(図3(C)参照)。

【0048】(D)次に、SOG膜108Lと $\text{SiO}_2$ 膜107と保護層Iをエッチバックして、露出したコンタクト層109の表面と面一になるように平坦化させる(図4(D)参照)。エッチングには平行平板電極を

用いた反応性イオンエッチング(RIE)法を採用し、反応ガスとして、 $\text{SF}_6$ 、 $\text{CHF}_3$ およびArを組み合わせ使用する。

【0049】(E)次に、コンタクト層109とリング状に接触する上側電極112を公知のリフトオフ法により形成する(図4(E)参照)。

【0050】(F)コンタクト層109は上側電極112の円形開口を介して露出しており、この露出面を十分に覆うように誘電体多層膜ミラー(上部ミラー)111を公知のリフトオフ法により形成する(図4(F)参照)。上部ミラー111は、電子ビーム蒸着法を用いて、 $\text{SiO}_2$ 層と $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 層を交互に例えば7ペア積層して形成され、波長800nm付近の光に対して98.5~99.5%の反射率を持つ。このときの蒸着スピードは、例えば $\text{SiO}_2$ が0.5nm/分、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 層が0.2nm/分とした。なお、上部ミラー111の形成には、上述のリフトオフ法以外にRIE法によるエッチングを用いてもよい。

【0051】しかる後、基板102の下面に、NiとAuGe合金とからなる下側電極101が形成されて、面発光型半導体レーザ装置が完成する。

【0052】次に、前述の様な低閾電流を持ち、外部微分量子効率の高い面発光型半導体レーザ装置を実現するための製造方法のポイントについてさらに詳述する。これまで述べてきたように、結晶成長によってDBRミラー層、クラッド層および多重量子井戸構造の活性層などを形成するので、結晶成長技術が本発明の面発光型半導体レーザ装置の製造方法において最も重要である。結晶成長技術には、

- (1) ヘテロ界面が原子層オーダーで急峻であること
- (2) 広い面積にわたって膜厚の均一性が高いこと
- (3) 膜厚、組成およびドーピング効率の再現性が高いこと

等が必要な要件である。

【0053】特に(1)の界面の急峻性が、面発光型半導体レーザ装置の特性の向上の為に重要である。化合物半導体の結晶成長技術において界面の急峻性を確保する方法には、分子線エピタキシー法(MBE法)、有機金属気相エピタキシー法(MOVPE法)がある。液相エピタキシー法(LPE法)は高純度の結晶成長が可能であるが、液相から固相への成長方法であるのでヘテロ界面の急峻性を実現する事は困難で、面発光型半導体レーザ装置の製造方法には適さない。これに対しMBE法とMOVPE法はそれぞれ分子線、気相から固相への成長方法であるので原理的には原子層オーダーの界面急峻性が得られる。

【0054】しかし、MBE法は分子線からの結晶形成であり成長速度を高めることはできず、0.01~0.1nm/秒といった比較的遅い成長速度しか得られず、面発光型レーザの様に数μm程度のエピタキシャル層を

必要とする結晶成長には不向きである。またMBE法は、その製造装置の構造上、大面積において均一かつ高品質に結晶成長させることは非常に難しく、また原料の充填量の制約から、連続した結晶成長の回数にも制限がある。このことは、結晶成長のスループットを制限する点であり、基板の量産を難しくする要因となっている。

【0055】これに対し、本実施例で用いているMOVPE法は、前述した、MBE法と同等の原子層オーダのヘテロ界面の急峻性が得られており、また、気相成長であるため原料の供給量を変化させることにより、0.01〜数nm/秒の成長速度を得ることができる。

【0056】また、(2)の膜厚の均一性については、成長装置の反応管形状を最適化することにより、例えば直径が3インチ円形基板のほぼ75%の面積で、±2%以内の膜厚分布が得られることが確認された。

【0057】(3)の再現性の点では、MBE法やMOVPE法は成長の制御性が原理上よいので、膜厚、組成およびドーピング効率の再現性が高く、本実施例の面発光型半導体レーザ装置を実現する結晶成長方法はMOVPE法が好ましい。

【0058】(3)の点については、MOVPE法において、以下に示す、本発明の光学的膜厚測定方法を適用した製造方法を組み合わせることにより、さらに再現性かつ制御性よくエピタキシャル層を作製することができる。

【0059】図5は、MOVPE法が適用され、かつ結晶成長中にエピタキシャル層の反射強度を常時測定することが可能な成膜装置の一例を模式的に示したものである。この成膜装置は、例えば横型水冷反応管を用いたMOVPE装置において、成長基板上部の水冷管部分を無くし、反応管外部から成長基板上に光を入れることが可能な光学窓を有する。

【0060】具体的には、このMOVPE装置は、マスフローコントローラ24によって組成が制御された原料ガスが供給される反応管10の周囲に、内部に例えば水を通すことによって反応管10を冷却する冷却部12が設けられている。反応管10の内部には基板Sを載置するためのサセプタ14が設けられ、このサセプタ14の基板載置面に面する部分の反応管10壁面に光学窓16が設けられている。光学窓16の上方には光源18および光検出部20が設置され、光源18から出射された光は光学窓16を介してサセプタ14上の基板Sに到達し、その反射光は再び光学窓16を介して光検出部20に到達するように構成されている。そして、光検出部20は、演算制御部22と接続され、この演算制御部22は前記マスフローコントローラ24に接続されている。

【0061】そして、光源18からの光は基板S上にはほぼ垂直(最大5°)に入射するように設定され、その反射光を光検出部20によって測定することにより、基板

S上にエピタキシャル成長を行いながら、後に詳述するように、同時に生成するエピタキシャル層の反射強度の変化を測定し、この反射強度変化を演算制御部22において所定の演算式によって処理し、得られたデータをマスフローコントローラ24にフィードバックできるように構成されている。

【0062】本実施例において特徴的なことは、前記光源18は2系統のモニタ光、つまり第1のモニタ光および第2のモニタ光を構成し、形成される半導体層に応じてモニタ光を変換できる点にある。

【0063】2系統のモニタ光を構成する光源18は、その構成は特に制限されないが、例えば図6(A)〜(C)に示すものを挙げることができる。

【0064】図6(A)に示す光源18においては、2つのレーザ光源18aおよび18bを近接して設置し、各光路上にコリメータレンズ18cおよび18dを設け、2本のレーザビームを平行光もしくは少なくとも基板より遠方に焦点を持たせるようにする。2本のモニタビームは、互いに1度以内の範囲に入ることが好ましく、平行であることが最も望ましい。また、この2本のモニタビームは基板S上において同一位置に照射されることが好ましい。

【0065】図6(B)に示す光源18においては、2つのレーザ光源18aおよび18bの各光路が互いに直交するように配置され、これらの光路の交点にハーフミラー18eを光路に対して例えば45度の角度で設置されている。また、各光源18aおよび18bとハーフミラー18eとの間には、光路上にコリメータレンズ18cおよび18dがそれぞれ設置されている。このタイプの光源18においては所定の波長を有する2本のモニタビームをハーフミラー18eを介することによって光軸を一致させたモニタビームとすることができる。

【0066】図6(C)に示す光源18においては、2つのレーザ光源18aおよび18bを同一線上に配置し、その光路上に、設置角度が調節可能なミラー18fを設けている。また、各光源18a、18bとミラー18fとの間にはそれぞれコリメータレンズ18c、18dが設けられている。

【0067】図6(A)および(B)に示す光源18においては、2本のモニタ光を独立に制御することができ、したがって常時2系統のモニタ光を照射することもでき、あるいは何れかの光源の作動をオン・オフすることによりモニタ光を切り換えることもできる。図6

(C)に示す光源18においては、ミラー18fの角度を切り換えることにより光源18a、18bからの光の一方を選択でき、モニタ光を切り換えることができる。

【0068】光源として用いられる半導体レーザとしては以下のものを例示することができる。なお、その波長範囲を併記する。

InGaAsP系 ; 1.2〜1.6μm, 0.6

2~0.9  $\mu\text{m}$

InGaAs 系 ; 0.96~0.98  $\mu\text{m}$

GaAlAs 系 ; 0.7~0.88  $\mu\text{m}$

InGaAlP 系 ; 0.62~0.67  $\mu\text{m}$

ZnSSe 系 ; 0.4~0.5  $\mu\text{m}$

ZnCdSe 系 ; 0.4~0.5  $\mu\text{m}$

GaInAlN 系 ; 0.3~0.5  $\mu\text{m}$

光源としては、上記のもの他に光学モニタ用として広く用いられているHe-Neレーザ（発振波長；0.63  $\mu\text{m}$ , 1.15  $\mu\text{m}$ ）などを用いることができる。

【0069】図7は、受光系の構成例を示し、同図

(A)は、モニタ光が1系統のタイプの構成を示し、同図(B)は2系統のモニタ光が用いられる場合の構成を示す。

【0070】図7(A)に示す装置においては、フォトダイオードあるいは光電子増倍管などからなる光検出部20が直接演算制御部22と接続され、モニタ光の反射光は光検出部20を介して演算制御部22に出力される。

【0071】図7(B)に示す装置においては、第1の光検出部20aおよび第2の光検出部20bとからなる光検出部20と、光検出部20a、20bと基板Sとの間に配置された、プリズムあるいはホログラムなどからなる分光部80と、スリット82とを有する。そして、第1の光検出部20aおよび第2の光検出部20bはスイッチ84を介して演算制御部22と接続されている。この装置においては、反射光が第1および第2のモニタ光を含んでいるため、この反射光を分光部80およびスリット82を介してそれぞれ第1および第2の光検出部20a、20bに送る。そして、スイッチ84によってモニタしたい出力を選択的に演算制御部22に出力する。

【0072】以上、モニタ光の照射および検出に用いられる装置の概略を説明したが、本実施例はこれに限定されるものではなく、通常用いられている光学手段、データ処理手段等を適宜用いることができる。

【0073】次に、第1および第2のモニタ光について詳述する。

【0074】第1のモニタ光は、第1クラッド層104を除く半導体層であって、少なくともDBRミラー、好ましくはDBRミラーおよび他の半導体層の光学的膜厚測定に用いられる。第2のモニタ光は、少なくとも第1クラッド層104の測定に用いられる。そして、第1のモニタ光および第2のモニタ光の波長は、以下の条件を満たすように設定される。

【0075】すなわち、DBRミラー103は所定の波長範囲、つまり少なくとも設計発振波長 $\lambda_0 \pm 30 \mu\text{m}$ に対して高い反射率、具体的には98.0%以上、より好ましくは99.0%以上、さらに好ましくは99.5%以上の反射率を持つことが望まれている。これを満た

すためには、DBRミラーを構成する各層の厚さが $\lambda/4n$ でなければならない。ここで、 $\lambda$ は所定波長（本実施例では設計発振波長 $\lambda_0$ ）、 $n$ は所定波長での屈折率を示す。

【0076】図8は、DBRミラーの反射率スペクトルを示し、縦軸は反射率を示し、横軸は波長を示している。この反射率スペクトルにおいては、反射率が99.5%以上の領域を「高反射帯域」という。なお、図8~図11に示す反射率スペクトルの縦軸は、反射強度を反射率として表したものである。具体的には、各モニタ波長において100%、50%、0%の反射率を持つリファレンスミラーを本実施例の成膜装置の基板位置に置いて測定を行い、本実施例の成膜装置における反射率と反射強度の関係をあらかじめ調べておくことで、反射強度を基板の反射率に変換したものである。

【0077】前記DBRミラーの設計波長（高反射帯域の中心波長）は、半導体レーザ装置の設計発振波長 $\lambda_0$ である800nmに設定されている。そして本実施例のようなAlGaAs系半導体の場合、成膜温度と室温の間には、約4.5%の光学的膜厚の差が存在するため、これを考慮してモニタ光の波長を設定することが望ましい。例えば、室温における波長800nmは成膜温度750℃において836nmに相当する。したがって、本実施例では第1のモニタ光として836nmの波長の半導体レーザによるレーザ光を使用した。この波長は、室温におけるDBRミラーの設計波長（800nm）に該当する。

【0078】また、第2のモニタ光の波長 $\lambda_m$ は、成膜温度において高反射帯域に含まれない波長に設定される。つまり、高反射帯域の最も小さい波長を $\lambda_1$ 、高反射帯域の最も大きい波長を $\lambda_h$ とすると、以下の関係 $\lambda_m < \lambda_1$   
 $\lambda_h < \lambda_m$

が成立する。第2のモニタ光の波長 $\lambda_m$ は、高反射帯域よりも小さい波長領域に設定されることが好ましく（図8参照）、本実施例では、第2のモニタ光として786nmの波長の半導体レーザによるレーザ光を使用した。その理由については後に詳述する。

【0079】図9は、本実施例の面発光型半導体レーザ装置を図5に示す成膜装置を用いてMOVPE成長させる工程において、DBRミラー103、第1クラッド層104および活性層105を構成するエピタキシャル層の反射率の経時的変化を示したものである。横軸がエピタキシャル層の成長時間を示し、縦軸が反射率を示している。図9に示す反射率測定においては、モニタ光としては、設計発振波長 $\lambda_0$ に成膜時の温度補正を加えた補正波長 $\lambda_0'$ （836nm）と同じ波長を有する第1のモニタ光を用いた。

【0080】図9において、成膜時間T0-T2はDBRミラー103の成膜工程に、成膜時間T2-T3は第

1 クラッド層104の成膜工程に、成膜時間T3-T4は活性層105の成膜工程にそれぞれ対応している。図9から明らかなように、DBRミラー103の前段(下部)の成膜(成膜時間T0-T1)および活性層105の成膜(成膜時間T3-T4)においては、反射率の変化が顕著であり極値(極大点および極小点)が明確に現れている。これに対し、DBRミラー103の後段(ミラー上部)の成膜(成膜時間T1-T2)および第1クラッド層104の成膜(成膜時間T2-T3)においては、反射率の変化が小さく明確な極値を測定できない。そこで、本実施例においては、少なくとも第1クラッド層104の成膜工程において、第1のモニタ光と異なる波長 $\lambda_m$ を有する第2のモニタ光によって測定を行う。以下、各成膜工程と反射率との関係について詳細に説明する。

#### 【0081】(a) DBRミラーの成膜

図11に、図9に示す、DBRミラー103の成膜工程の前段における反射率スペクトルを模式的に拡大して示す。

【0082】図11から明らかなように、GaAs基板上に初め低屈折率 $n_1$ の $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ を積層すると光学的膜厚が増加するにつれ反射率が減少する。光学的膜厚が $(\lambda_0/4n_1)$ になると極小点①を向かえるので、この極小点をモニタして、高屈折率 $n_2$ の $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ の積層に切り替える。そして、 $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ 層の光学的膜厚が増加すると反射率は増加していくが、光学的膜厚が $(\lambda_0/4n_2)$ になると極大点②に到達するので、再び低屈折率 $n_1$ の $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$ の積層に切り替える。この操作を繰り返すことにより、DBRミラーは、その反射率が低反射率および高反

射率をくり返しながら変動し、反射率が増加していく。【0083】この反射率の変化は、結晶の成長速度や成長時間に依存せず、各層の光学的膜厚のみに依存している。従って、反射率スペクトルの極値(1次微分値0)で積層する層のAl組成を変更し、屈折率の違う層を交互にエピタキシャル成長させることにより、各層が理論通りの光学的膜厚 $(\lambda/4n)$ を持ったDBRミラーが得られる。

【0084】図9に示すように、DBRミラーの成膜工程において、ミラーのペア数が増加すると反射率が大きくなるが、それに伴って反射率の変化率が小さくなる。実用上、反射率の極大点および極小点を精度よく検出するためには、連続する極大点と極小点との差が反射率で少なくとも10%程度必要である。この事を考慮すると、DBRミラーの高反射率の領域(図9における成膜時間T1-T2の領域)、すなわち例えば極大点と極小点との差が反射率で10%程度となる成膜時間T1以降は、前段の成膜時間T0-T1で求められた測定データから成膜速度を求め、この成膜速度をもとに各層の光学的膜厚をコントロールすることができる。

#### 【0085】(b) 第1クラッド層の成膜

図10は、波長 $\lambda_m$ を有する第2のモニタ光によって、第1クラッド層104および活性層105をモニタして得られた、成膜時間と反射率との関係を示す図である。図10から明らかなように、第2のモニタ光を用いた測定においては、第1クラッド層の成膜工程(成膜時間T2-T3)において、第1のモニタ光(波長: $\lambda_0'$ )を用いた場合にはほとんど見られなかった反射率の変化が顕著に現れ、極小点と極大点が明瞭に現れていることがわかる。

【0086】第2のモニタ光で用いられる波長 $\lambda_m$ は、前述したように、DBRミラーの高反射帯域から外れた波長であることが必要である。具体的には、波長 $\lambda_m$ はDBRミラーの高反射帯域より短波長側もしくは長波長側で選択されることが必要であり、さらに短波長側の波長であることが望ましい。その理由は、反射率の絶対値を測定することは精度的に困難であるため、通常は反射強度の極大点および極小点によって波数を求める。そのため、評価できる光学的な最低膜厚はモニタ光の波長で1/4の波数となる。従って、モニタ光の波長が短いほど、測定可能な光学的膜厚が小さくできる。

【0087】そして、第2のモニタ光の波数 $(1/4)$ に対応する成膜時間 $\Delta T$ から成膜速度を算出することができ、さらに得られた成膜速度から最終的に必要な光学的膜厚の成膜時間が算出できる。したがって、光学的膜厚モニタに時間制御を併用することにより、設計共振波長 $\lambda_0$ (補正波長 $\lambda_0'$ )における任意の波数 $N_0$ の光学的膜厚を得ることができる。

【0088】例えば、図12に示すように、第2のモニタ光における極小点と極大点との時間間隔、すなわち波長 $\lambda_m$ のモニタ光の1/4波数( $N_m$ )に相当する成膜時間を $\Delta T$ とすると、第1クラッド層を形成するために必要な成膜時間 $T_{END}$ (T3-T2)は下記(式1)で表される。

#### 【0089】

##### 【数1】

(式1)

$$T_{END} = 4N_0 \frac{\lambda_0'}{\lambda_m} \frac{n_m}{n_0'} \Delta T$$

【0090】(式1)において、 $n_m$ 、 $n_0'$ は、それぞれ波長 $\lambda_m$ 、 $\lambda_0'$ での成膜温度における屈折率であるが、 $n_m$ と $n_0'$ はほとんど同じ温度依存性を示すので、その比は温度によらず一定と見なせる。したがって、 $n_m$ および $n_0'$ としてそれぞれの波長での室温における屈折率を代入することができる。

【0091】第1クラッド層の測定に用いられる波長 $\lambda_m$ の第2のモニタ光は、波長 $\lambda_0$ の第1のモニタ光と同時に2系統で基板に照射されていてもよく、あるいは所定のタイミング(図9および図10における成膜時間T2

-T3)において、第1のモニタ光から第2のモニタ光に変換されるシステムでもよい。

【0092】(c) 活性層およびその他の層の成膜  
活性層105の成膜においては、図9に示すように、波長 $\lambda_0$  (補正波長 $\lambda_0'$ ) の第1のモニタ光による反射率がDBRミラーの影響を受けずに大きく変動し、その極値を明確に測定することができるため、第1のモニタ光による光学的膜厚の測定を行うことにより光学的膜厚を正確に制御することができる。活性層105の上に順次積層される第2クラッド層106およびコンタクト層109の成膜においても、引き続き第1のモニタ光を用いた光学的膜厚の測定を適用することが望ましい。

【0093】さらに、この成膜方法では、DBRミラー自体の反射強度を結晶成長中に測定できることから、層形成中にDBRミラーのペア数を変更したり、構造の最適化がはかれる。

【0094】また、反射強度の極値から、DBRミラーより上部の第1クラッド層および活性層などの各層の光学的膜厚も正確に制御できることから、従来の成長時間を管理する成膜方法に比べ、再現性がよく、かつスループットが高い方法で、結晶成長基板を作製できる。実際に、本実施例の成長方法により、面発光型レーザ素子に好適な99.5%以上の反射率を持つDBRミラーが制御性よく得られた。

【0095】上述した、層の反射率をモニタして結晶層の光学的膜厚を制御する方法は、MOVPE法だけでなく、他の成膜プロセス、例えばMBE法などにも使用できる。

【0096】次に、柱状共振器部をRIBE法で形成する工程(図3(B)参照)に、上述した反射率をモニタする手段を使用した実施例について述べる。

【0097】前述したように、共振器部114の作製には、垂直側面が得られ、かつ表面ダメージの少ない点から、RIBE法によるエッチングを行っている。この柱状共振器部の形成において重要なポイントは、エッチング深さ、つまり第2クラッド層106の残り膜厚 $t$ を制御することである。この残り膜厚を管理して、所定の厚さにしなければならない理由は先に記した。

【0098】RIBE法によるドライエッチングを行いながら、残り膜厚を測定する方法を、以下に具体的に示す。

【0099】図13に、エッチングしながらエピタキシャル層の反射率を測定できるRIBE装置の概略図を示す。

【0100】このRIBE装置は、エッチング室30に、プラズマ室40および排気手段を構成する真空ポンプ32が接続されている。エッチング室30は、前記プラズマ室40に対向する位置に基板Sを載置するための

ホルダ34を有する。このホルダ34は、ロードロック室50を介して進退自由に設けられている。エッチング室30のプラズマ室40側の側壁には、光学窓36および38が対向する位置に設けられている。そして、エッチング室30内には、前記光学窓36および38を結ぶライン上に一对の反射ミラーM1およびM2が設けられている。一方の光学窓36の外方には光源26が設置され、他方の光学窓38の外方には光検出部28が設置されている。また、プラズマ室40は、マイクロ波導入部44および反応ガスをプラズマ室40に供給するためのガス供給部46および48が連結されている。そして、プラズマ室40の周囲にはマグネット42が設けられている。

【0101】このRIBE装置においては、通常の方法によって基板S上に形成された結晶層をエッチングするとともに、光源26から照射される光を光学窓36および反射ミラーM1を介して基板S上に照射し、その反射光を反射ミラーM1および光学窓38を介して光検出部28によって測定することにより、基板S上の結晶層の反射率をモニタすることができる。

【0102】次に、図14(A)～(C)に基づいて、エッチング中の第2クラッド層の残り膜厚 $t$ の測定方法を具体的に説明する。

【0103】エッチング前状態(図3(A)で示す状態)での共振器を構成するエピタキシャル結晶層は、図14(A)に示す様な反射スペクトルを示す。DBRミラーの反射率が非常に高く、かつDBRミラー上の結晶層の膜厚が薄いことから、スペクトルの概容はDBRミラーの反射スペクトルとなっている。また外部から結晶層に光を入射すると、DBRミラー上に積層された結晶層内に定在波(縦モード)が存在する波長で活性層が光を吸収するため、その波長での反射率が低下し、反射スペクトル内にくぼみ、つまりディップ(D<sub>0</sub>)を形成する。

【0104】このディップ(D<sub>0</sub>)の波長 $\lambda_0$ は、DBRミラーから上の結晶層の光学的膜厚に対応することから、エッチングにより光学的膜厚が薄くなると、ディップ(D<sub>0</sub>)も短波長側に移動して波長 $\lambda_1$ となる(図14(B)参照)。

【0105】さらに、長波長側に次のディップ(D<sub>1</sub>)(波長: $\lambda_2$ )が発生し、これが短波長側の波長 $\lambda_1$ へと移動する(図13(C)参照)。さらにエッチングを続けると、再び長波長側に新たなディップが発生し、ディップの移動と発生が繰り返される。エッチング前の状態から、 $a$ 個めのディップの波長を $\lambda_a$ とすると、この時のエッチング量 $\Delta a$ は下記(式2)で表される。

【0106】

【数2】

21  
(式2)

22

$$\Delta_s = \frac{1}{n} \left( \Theta + \frac{m}{2} \right) \lambda_0 - \left( \Theta + \frac{m-a}{2} \right) \lambda_s$$

$$\text{ここで、 } m = \frac{\lambda'' + 2\Theta(\lambda' - \lambda'')}{\lambda'' - \lambda'}$$

【0107】(式2)において、 $\Theta$ は構造から決まる定数で、本実施例では $1/2$ または $1/4$ 、 $n$ はエピタキシャル層の平均屈折率である。

【0108】このようにエッチングによりディップが短波長側にシフトして高反射帯域からはずれても、長波長側に次の縦モードに対応するディップが発生し、これがさらに短波長側にシフトするので、エッチング中に高反射帯域に存在するディップの数および波長移動量を測定することにより、エッチング量およびエッチング速度を管理できる。したがって、第2クラッド層において所定の残り膜厚を有する共振器部114を正確に作製することができる。

【0109】また、反射スペクトルの値や形状もエッチング中に同時にモニタできるので、エッチング時の表面の汚れ、ダメージなども評価でき、これらの評価結果をエッチング条件にフィードバックすることができる。

【0110】さらに、反射率のモニタ手段を使ったプロセスとして、RIE法による $\text{SiO}_2$ 層のエッチングについて説明する。

【0111】図1に示す面発光型半導体レーザ装置の作製工程においては、前述したように、レーザ光出射側のリング状の上側電極112を形成する前まで、共振器表面のp型コンタクト層109は表面保護用の $\text{SiO}_2$ 層I(図3(B)参照)で覆われているが、上側電極を形成するためには、この $\text{SiO}_2$ 層を完全にエッチングしなければならない。ただし、必要以上にエッチングを行うと、コンタクト層もエッチングすることになり、コンタクト層へダメージを与えたり、発振波長に関係する共振器長が変化してしまう問題が起こる。

【0112】従って、 $\text{SiO}_2$ 層Iのエッチング量の管理が重要である。そこで、本実施例では $\text{SiO}_2$ 層Iのエッチングに使用するRIE装置に、エッチング中にエ

ピタキシャル結晶層の反射率を測定できる方法を導入し、エッチング量を測定することとした。

【0113】図15に反射率測定手段を導入した平行平板型RIE装置の概略図を示す。このRIE装置においては、エッチング室60内に、RF発振器61に接続された載置電極62とメッシュ状の対向電極64とが対向して設けられている。エッチング室60には、ガス供給部70と排気用の真空ポンプ66とが接続されている。そして、エッチング室60の、前記載置電極62と対向する壁面には、光学窓68が設けられており、この光学

窓68の外方には光源72と光検出部74とが設置されている。そして、光源72から照射された光は光学窓68を介して基板Sに到達し、その反射光は光学窓68を介して光検出部74に至る。このRIE装置においては、通常メカニズムによって $\text{SiO}_2$ 層がエッチングされるとともに、光源72からの光を検出することによってエッチング面の反射率をモニタすることができる。

【0114】図16は、p型コンタクト層109上に $\text{SiO}_2$ 層があるときの、800nmの光に対する反射率の変化を示したものである。横軸が $\text{SiO}_2$ 層の光学的膜厚、縦軸が反射率である。図に示したように、反射率は $\text{SiO}_2$ 層の残り膜厚によって変化し、残り膜厚が

$(\lambda/4n)$ になるごとに極大点と極小点を取り、 $\text{SiO}_2$ 層が完全にエッチングされると反射率変化はなくなる。ここで $\lambda$ は測定光源の波長、 $n$ は $\text{SiO}_2$ 層の屈折率である。従って、RIEによるエッチング中に反射率を測定し、反射率曲線の極値をモニタすることにより、 $\text{SiO}_2$ 層のエッチングを完全に行うことができる。

【0115】また、 $\text{SiO}_2$ 層の完全なエッチング終了後、前記RIEプロセスと同様に、RIE中の反射率測定の光源として分光器を通した光若しくは波長可変のレーザ光を用いて例えば700~900nmの波長の光を照射することにより、反射率のディップが測定でき、共振器長が測定できる。つまり、この反射率のディップを測定しながらRIEによるエッチングを進めると、エッチング量は前記(式2)で求められ、共振器長を正確に制御することができる。ここで、RIEを用いているのは、p型コンタクト層109を保護するための $\text{SiO}_2$ 層を完全にエッチングした後、同一装置内でエッチングが可能なこと、またRIEによるエッチングよりもエッチング速度が遅いので共振器長を制御しやすいことが挙げられる。このときのエッチング条件としては、例えば、圧力2Pa、RFパワー70Wとし、エッチングガスとしては $\text{CHF}_3$ を使用した。

【0116】前述した様に本発明の面発光型半導体レーザ装置の実現には、DBRミラーの高反射帯域と共振器長によって定まる発振波長を設計発振波長にしなければならないが、エピタキシャル成長後に仮にその設計発振波長が得られなくとも、反射率をモニタしたRIEを用いることにより、共振器長を所定長さに精度良くエッチングできるので、高い精度のデバイスを歩留まりよく製造することが可能である。

【0117】また、反射率をモニタしたエッチングを用いることにより、基板面内で共振器長の異なる部分を精度良く作ることもでき、1枚の基板で発振波長の異なる面発光型半導体レーザ装置を作製することもできる。

【0118】

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明を適用した面発光型半導体レーザ装置の断面を模式的に示す斜視図である。

【図2】図1に示す面発光型半導体レーザ装置のクラッド層の残り膜厚  $t$  と外部微分量子効率（スロープ効率）10の値との関係を示す図である。

【図3】(A)～(C)は、図1に示す面発光型半導体レーザ装置の製造プロセスを模式的に示す断面図である。

【図4】(D)～(F)は、図3に引き続いて行われる、図1に示す面発光型半導体レーザ装置の製造プロセスを模式的に示す断面図である。

【図5】図1に示す面発光型半導体レーザ装置の半導体層を形成する際に用いられるMOVPE装置を模式的に示す図である。

【図6】(A)～(C)は、図5に示すMOVPE装置の光源の構成例を示す図である。

【図7】(A)および(B)は、図5に示すMOVPE装置の受光系の構成例を示す図である。

【図8】図1に示す面発光型半導体レーザ装置のDBRミラーの反射率と波長との関係を示す図である。

【図9】第1のモニタ光を用いて得られた、DBRミラー、第1クラッド層および活性層の成膜工程における成膜時間と反射率との関係を示す図である。

【図10】第2のモニタ光を用いて得られた、第1クラ 30

ッド層および活性層の成膜工程における成膜時間と反射率との関係を示す図である。

【図11】図9に示す、DBRミラーの成膜工程の前段における成膜時間と反射率との関係を模式的に示す図である。

【図12】第2のモニタ光を用いた、第1クラッド層の成膜における時間と反射率との関係を示す図である。

【図13】図1に示す面発光型半導体レーザ装置の製造プロセスにおいて用いられるRIBE装置を模式的に示す図である。

【図14】(A)～(C)は、RIBEプロセスにおける反射スペクトルの変化を示す図である。

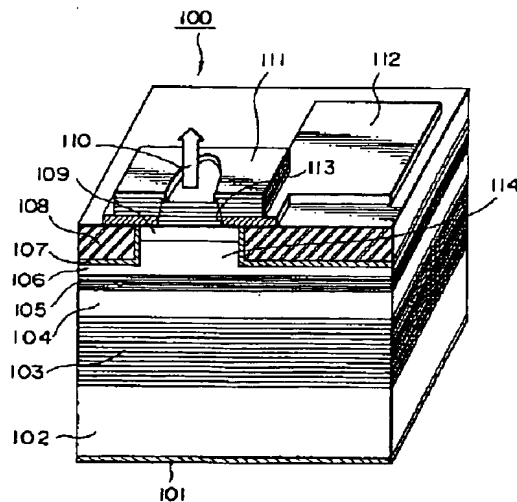
【図15】図1に示す面発光型半導体レーザ装置のエッチングプロセスにおいて用いられるRIBE装置を模式的に示す図である。

【図16】図15に示す装置を用いてRIBEを行ったときの  $\text{SiO}_2$  層の光学的膜厚と反射率との関係を示す図である。

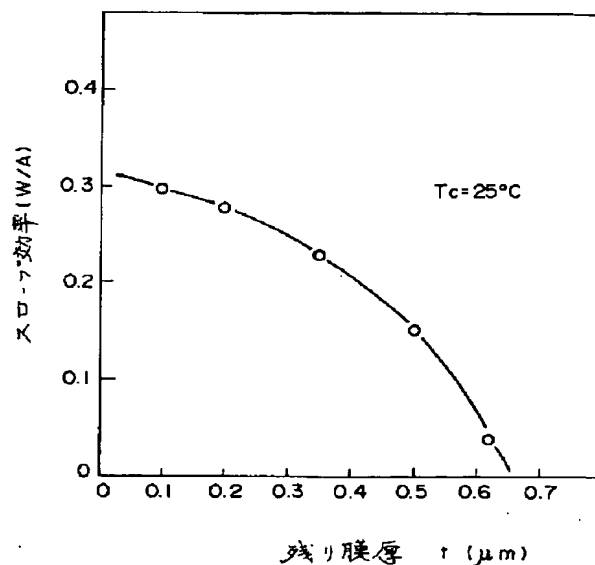
【符号の説明】

- 102 基板
- 103 DBRミラー
- 104 第1クラッド層
- 105 活性層
- 106 第2クラッド層
- 107 第1絶縁層
- 108 第2絶縁層
- 109 コンタクト層
- 111 誘電体多層膜ミラー
- 114 共振器部

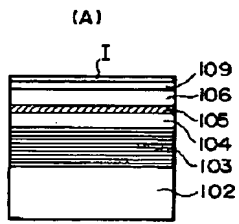
【図1】



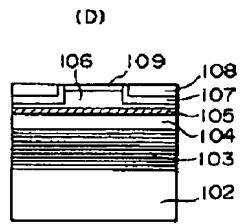
【図2】



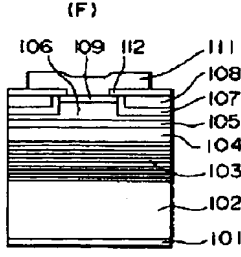
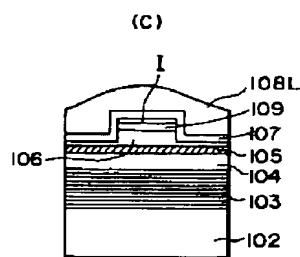
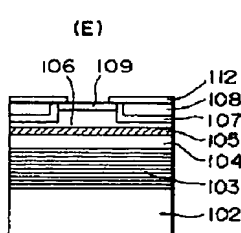
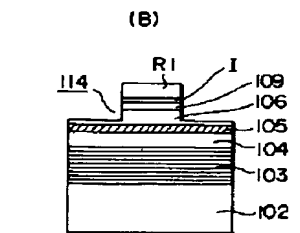
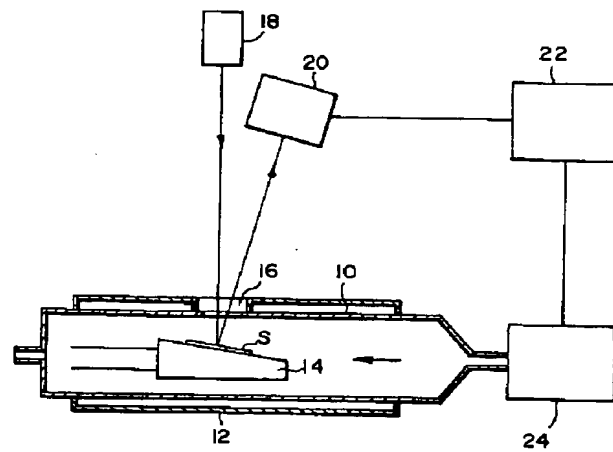
【図3】



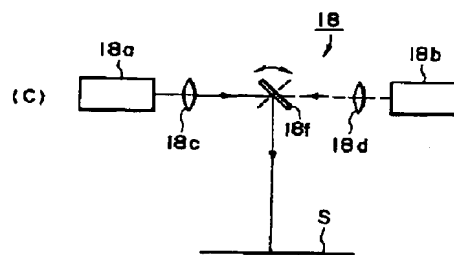
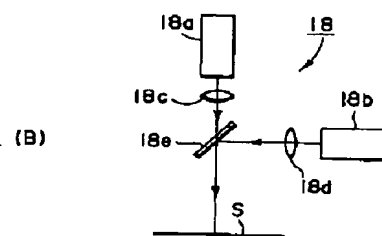
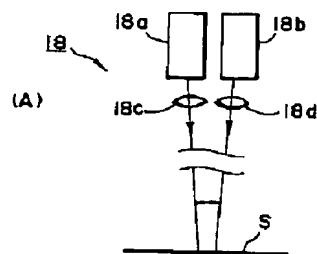
【図4】



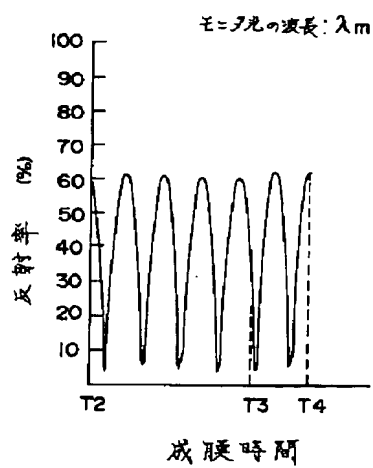
【図5】



【図6】

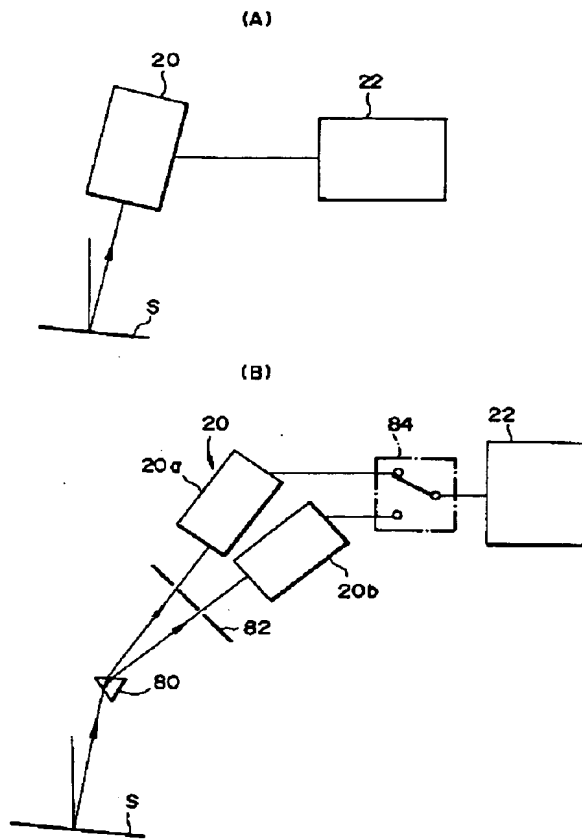


【図10】

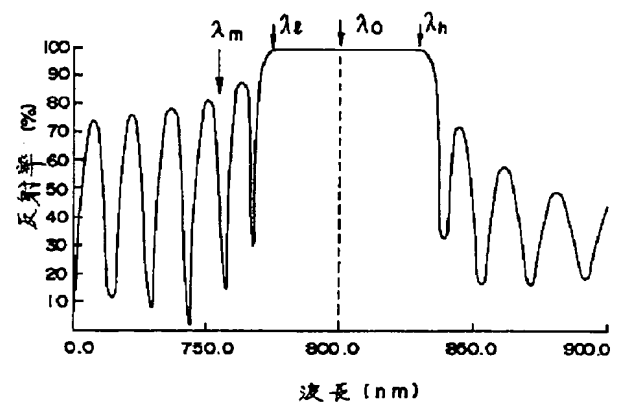




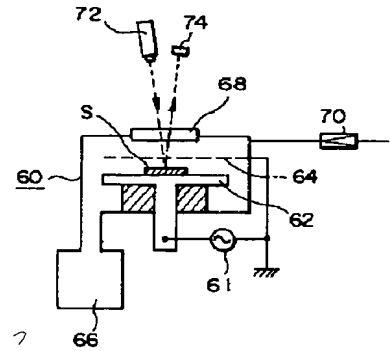
【図7】



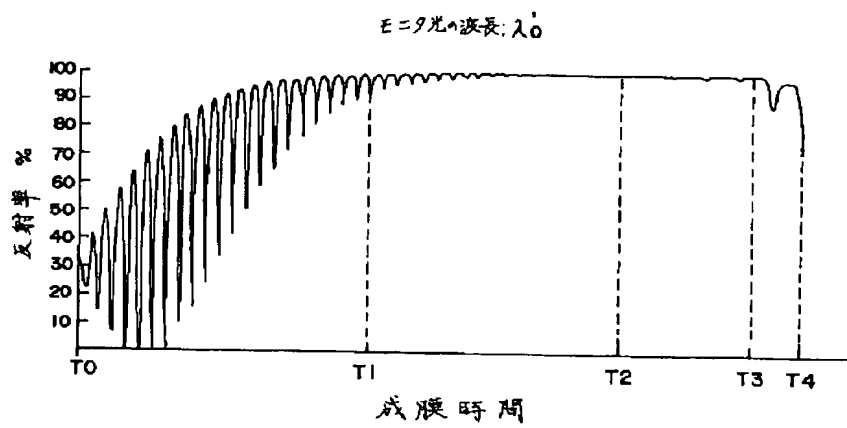
【図8】



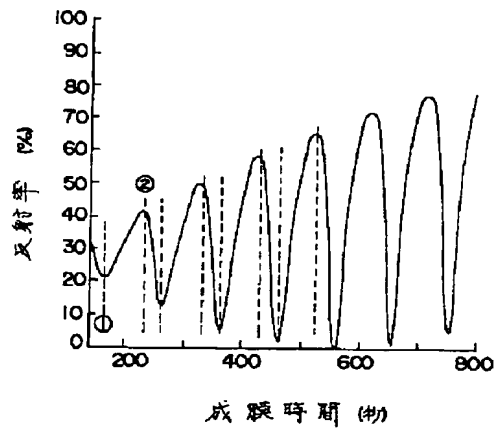
【図15】



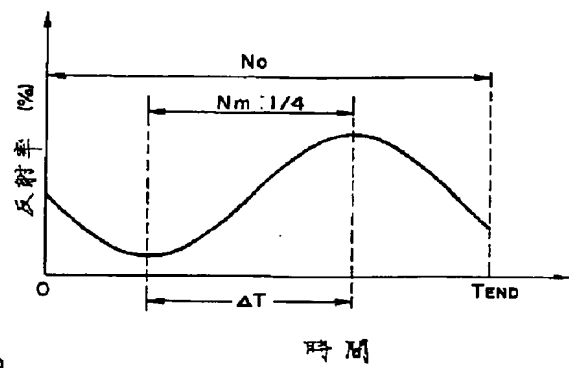
【図9】



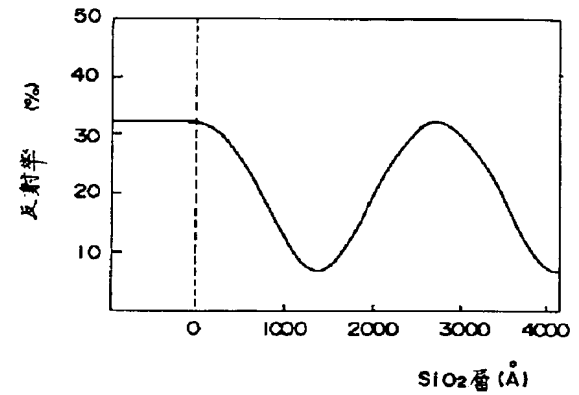
【図11】



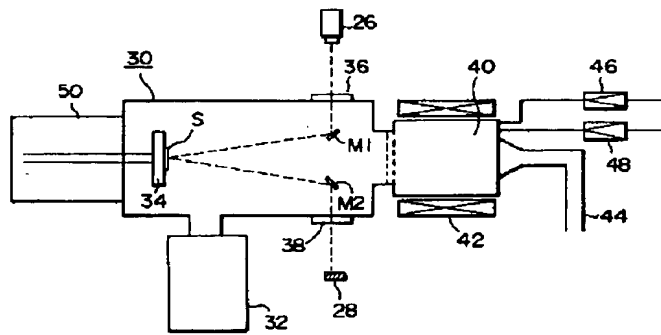
【図12】



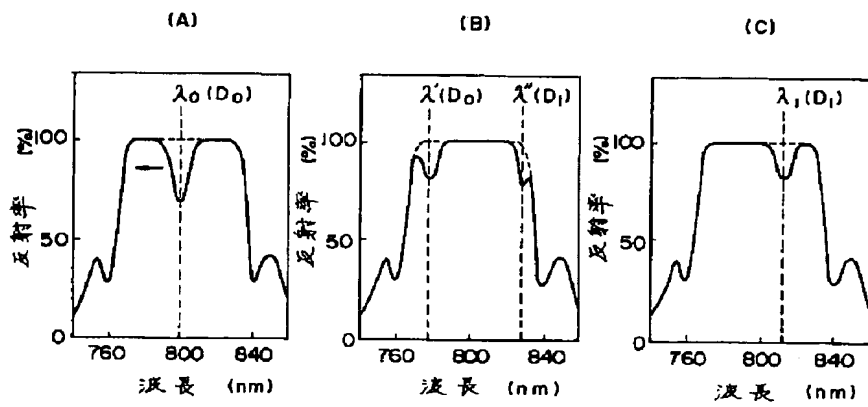
【図16】



【図13】



【図14】



フロントページの続き

(51)Int. Cl.<sup>6</sup>

H01L 21/66

H01S 3/18

識別記号

庁内整理番号

FI

H01L 21/66

H01S 3/18

技術表示箇所

P

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**